CHAPITRE 1 :
GENERALITES SUR LES ANTENNES

I. DEFINITION

Une antenne est un dispositif qui assure la transition entre un guide d'onde et l'espace libre dans lequel ces ondes vont se propager, ou inversement.

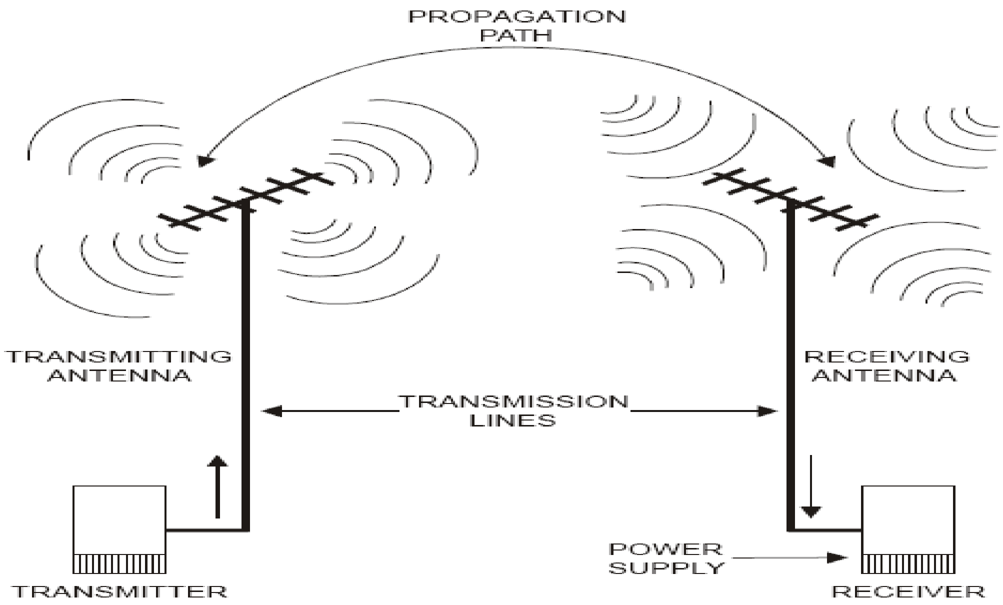
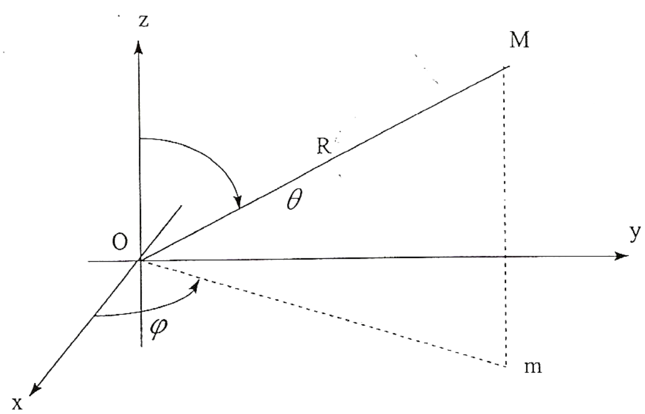


Figure 1-3. Typical Radio Link.

II. DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

1) DEFINITION



La répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée ou reçue est caractérisée par le diagramme de rayonnement de l'antenne.
Le diagramme de rayonnement peut soit :

a) Représenter la répartition de la puissance par unité d'angle solide dans la direction d'angle solide $\mathrm{P}(\theta,\varphi)\ (W/m^2)$

Le **diagramme de rayonnement en puissance** est défini par le rapport :

$$r(\theta,\varphi)=\frac{\mathrm{P}(\theta,\varphi)}{P_{\max}}.$$

Où : $P_{\max}$ est la densité de puissance maximale mesurée.

b) Soit être tracé en fonction du champ rayonné $E(\theta,\varphi)\ (V/m)$

Les propriétés des ondes planes permettent d'écrire : $\mathrm{P}(\theta,\varphi)=\frac{1}{2}\frac{|\vec{E}|^2}{120\pi}\ (W/m^2)$.

Donc, le **diagramme de rayonnement en champ** est déterminé à partir de la racine carrée de la densité de puissance : $r_{champ}(\theta,\varphi)=\sqrt{r(\theta,\varphi)}$

Donc, il suffit de connaître l'un de ces deux diagrammes.

Ces diagrammes sont le plus souvent exprimés en dB :

$$r_{dB}(\theta,\varphi)=10\log_{10}(r(\theta,\varphi)).$$

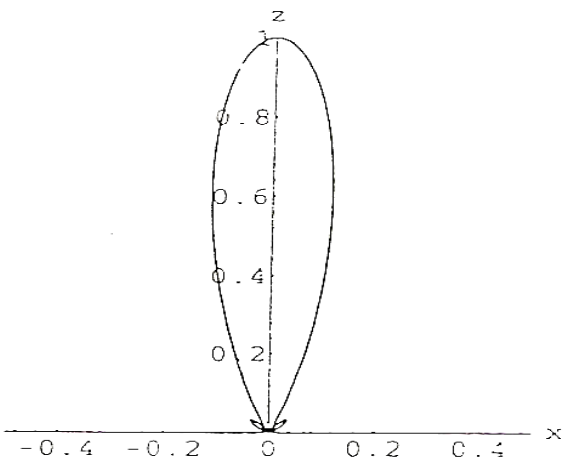
2) REPRESENTATION GRAPHIQUE

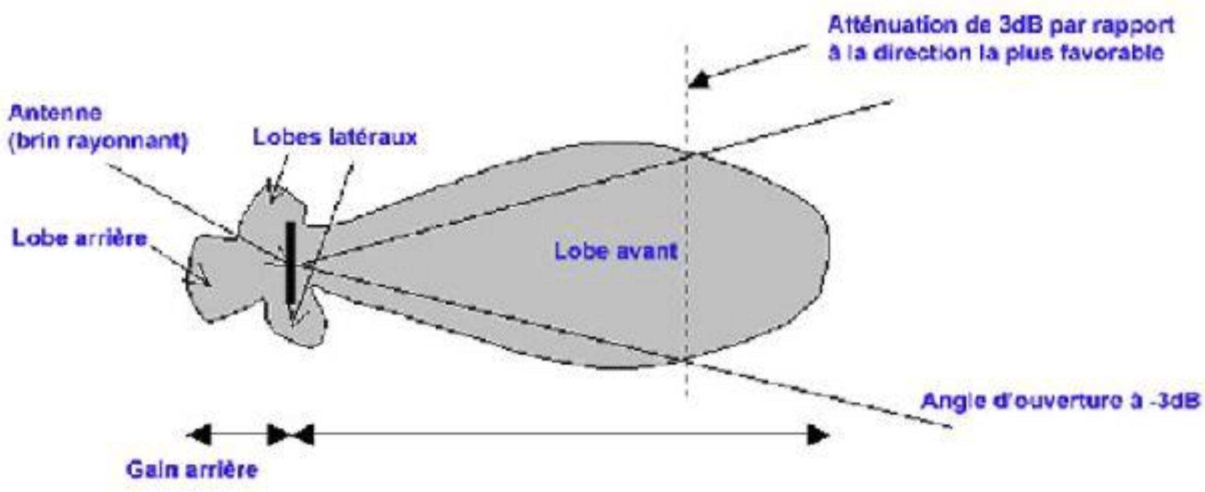
La connaissance de ces diagrammes est de grande importance.

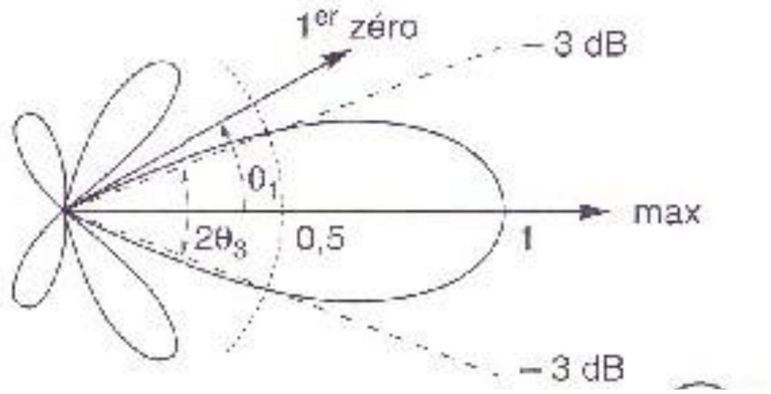
Il est plus facile de faire des coupes, l'une par un plan vertical et l'autre par un plan horizontal.

Il y a plusieurs représentations graphiques possibles. Le diagramme de rayonnement peut être représenté en :

a) coordonnées polaires :

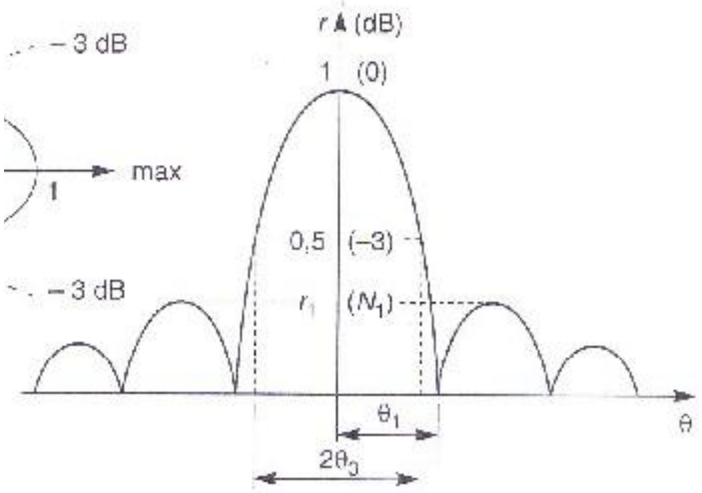






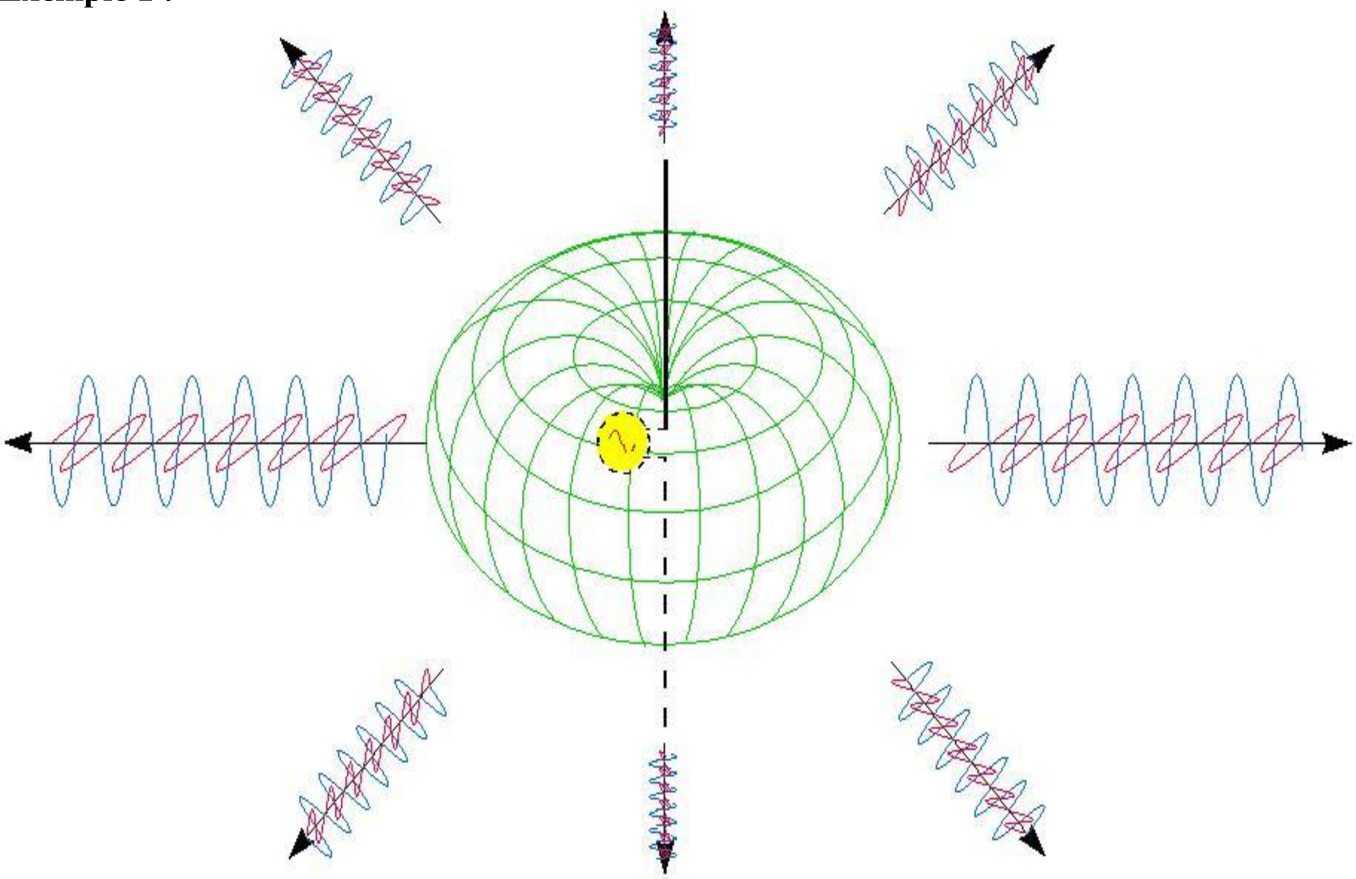
b) en coordonnées cartésiennes

Avec une échelle linéaire pour $r(\theta,\varphi)$:



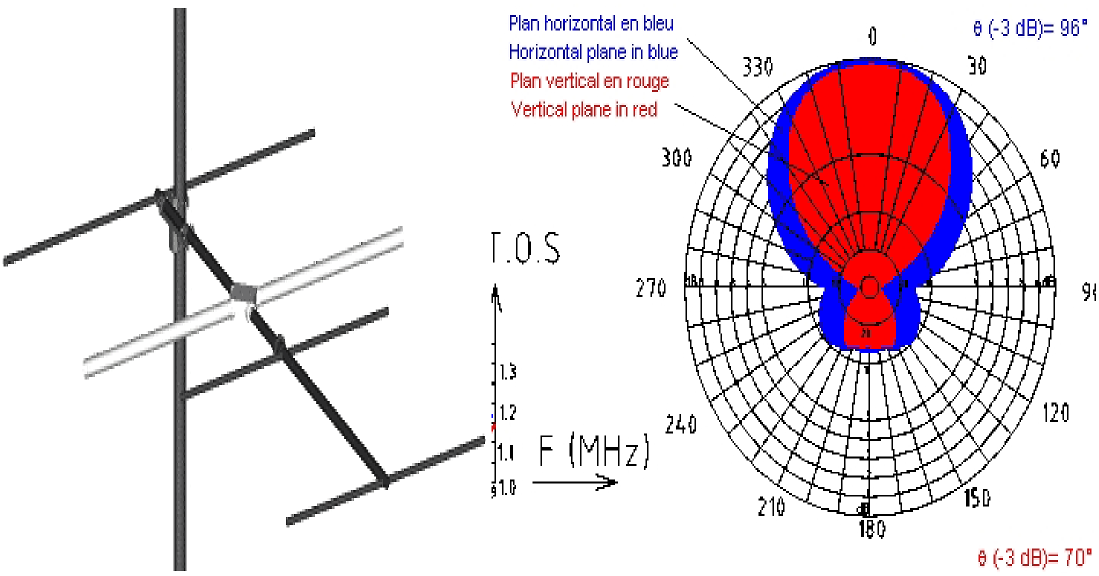
3) EXEMPLES DE DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT

Exemple 1 :

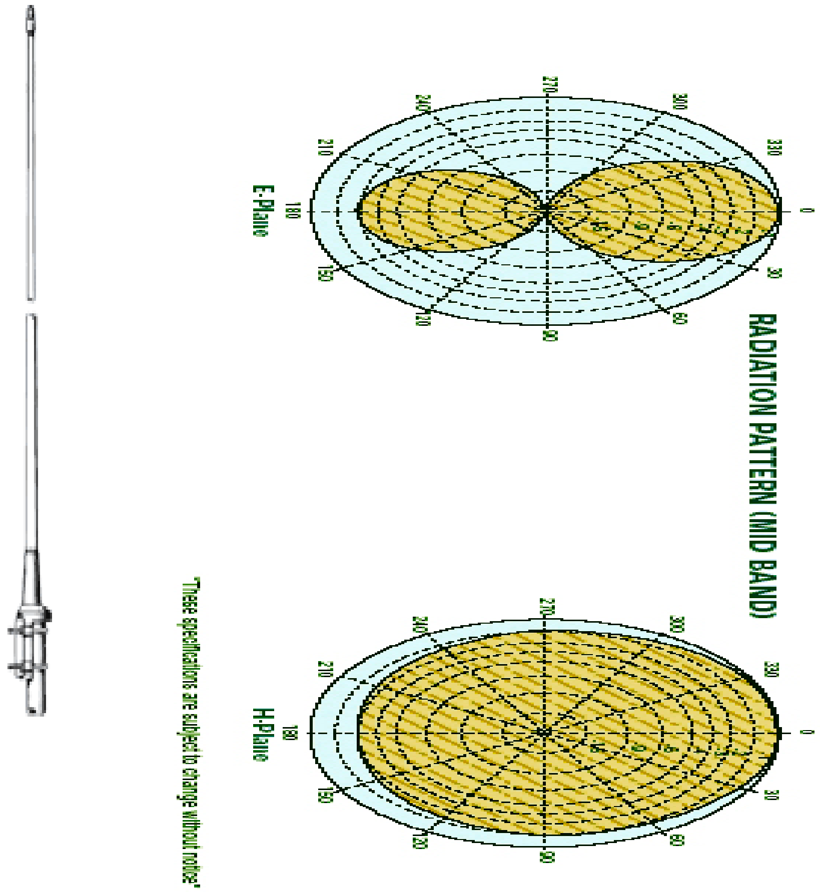


Répartition relative de l'énergie : diagramme de rayonnement (vert)

Exemple 2 :



Exemple 3 :



III. GAIN D'UNE ANTENNE

Le gain d'une antenne est le rapport entre la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne dans la direction (θ,φ) et la densité de puissance à rayonnement isotrope, les 2 antennes étant alimentées par la même puissance.

On notera :

- $\mathrm{P}(\theta,\varphi)$: la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive (W/m^2).
- P_0 : la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope (W/ m^2).
- P_t : la puissance totale rayonnée par les deux antennes (W).

Le gain est alors donné par : $G(\theta,\varphi)=\dfrac{\mathrm{P}(\theta,\varphi)}{P_0}=\dfrac{\mathrm{P}(\theta,\varphi)}{P_t/4\pi R^2}=\dfrac{4\pi R^2\mathrm{P}(\theta,\varphi)}{\iint_S \mathrm{P}(\theta,\varphi)ds}$

La surface d'intégration S est une surface fermée pouvant être une sphère de centre O, position de l'antenne, et de rayon R ; $ds = R^2.\sin\theta.d\theta.d\varphi$; $0 \leq \theta \leq \pi$ et $0 \leq \varphi \leq 2\pi$

On peut écrire : $G(\theta,\varphi) = \dfrac{4\pi R^2 \left| f(\theta,\varphi)\right|^2}{\iint_S \left| f(\theta,\varphi)\right|^2 ds} = \dfrac{4\pi R^2 \left| r(\theta,\varphi)\right|}{\iint_S r(\theta,\varphi) ds}$

Dans le cas où le diagramme ne dépend que de θ et pas de φ, l'intégrale se simplifie et s'écrie :

$$G(\theta) = \frac{4\pi R^2 \ f^2(\theta)}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} R^2 f^2(\theta)\sin\theta\, d\theta} = \frac{2 f^2(\theta)}{\int_0^{\pi} f^2(\theta)\sin\theta\, d\theta} = \frac{2r(\theta)}{\int_0^{\pi} r(\theta)\sin\theta\, d\theta}$$

Avec : θ : angle entre une direction courante et l'axe de l'antenne.

f(θ) : fonction de rayonnement en champ de l'antenne.

Lorsqu'on parle de gain d'une antenne, on parle souvent de gain maximal.

Donc, $G_{\max}$ est obtenu pour $r(\theta) = 1$. Donc, $G_{\max} = \dfrac{2}{\int_0^{\pi} r(\theta)\sin\theta\, d\theta}$

Donc, comme le gain et le diagramme de rayonnement sont intimement liés, on pourra calculer le gain d'une antenne connaissant son diagramme de rayonnement.

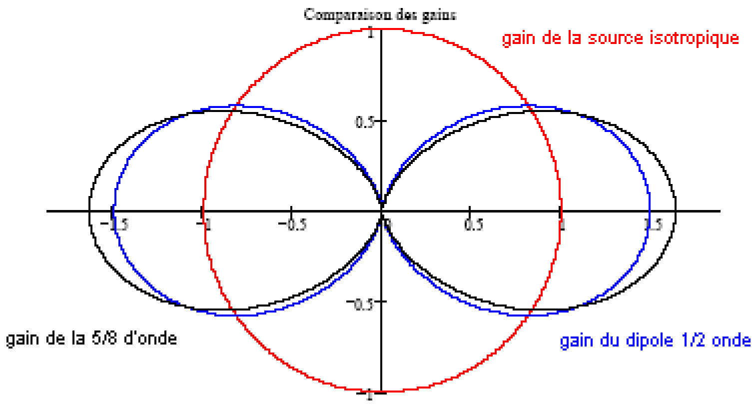
Lorsque 'on parle de gai d'une antenne, on désigne le gain maximum de l'antenne exprimé en dB : $G_{dB} = 10\log_{10}(G)$.

Pour avoir un gain élevé, l'antenne doit avoir un diagramme de rayonnement directif et réciproquement.

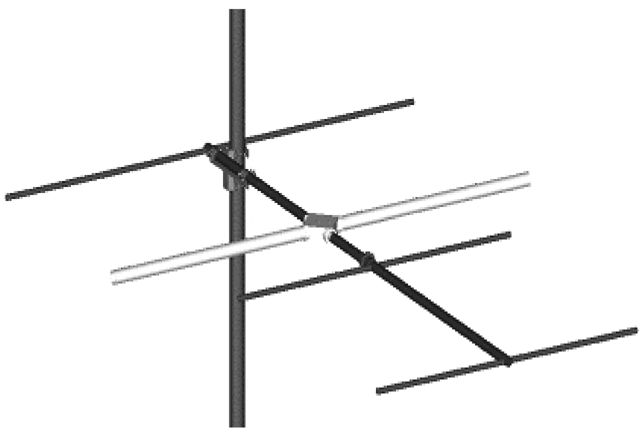
Ordre de grandeur de $G_{\max}$:

- Antenne de réception de télévision : 10 dB
- Antenne autodirecteur de missile : 20 dB
- Antenne de radar de poursuite : 30 dB
- Antenne de radar de surveillance : 40 dB
- Antenne de radioastronomie : 50 dB

- Une antenne isotrope n'a pas de gain, donc = 0 dB. (C'est une antenne imaginaire qui rayonne uniformément dans toutes les directions).
- Une antenne dipôle possède un gain de 2,15 dB par rapport à l'antenne isotrope. On dit aussi qu'elle a un gain de 2,15 dBi.



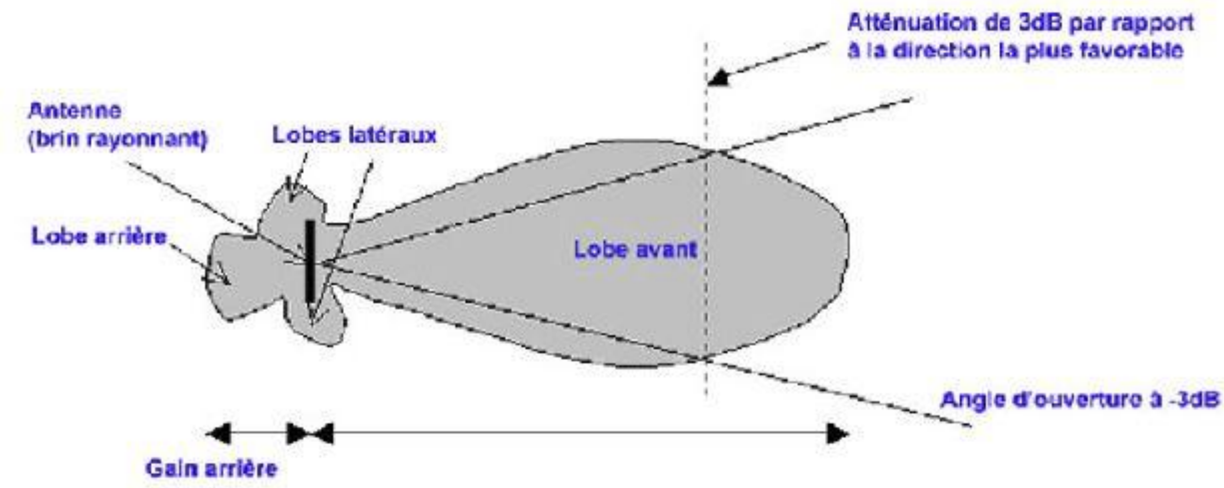
- Une antenne peut être soit unidirectionnelle, si elle ne présente qu’un seul lobe principal ;soit bidirectionnelle si elle présente deux libes principaux soit omnidirectionnelle si elle ratonne dans toutes les directions.
- Exemple d’antenne unidirectionnelle :

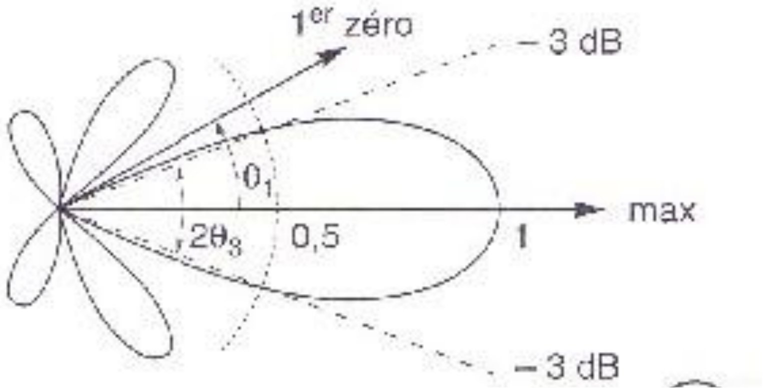


Antenne de réception TV unidirectionnelle

IV. ANGLE D’OUVETURE D’UNE ANTENNE

L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié (-3dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable.





V. RESISTANCE DE RAYONNEMENT

La résistance de rayonnement est définie en un point M de l'antenne parcouru par un courant I_M.

La résistance de rayonnement modélise l'antenne et représente la puissance rayonnée active. En effet, l'antenne rayonne de l'énergie associée aux champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{H}$ qu'elle émet. La résistance de rayonnement R_M est donnée par la loi d'Ohm :

$$R_M = \frac{P_t}{I_M^2} = \frac{P_t}{\left(\frac{\sqrt{2}}{2} I_0\right)^2} = \frac{P_t}{I_0^2/2} = \frac{2}{I_0^2} \iint_S P(\theta,\varphi) ds \quad .$$

Où : I_M :courant efficace au point M

$I_{\grave{a}}$:courant maximal au point M

VI. RAPPELS SUR LES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

1) EQUATIONS DE MAXWELL

Les équations de Maxwell qui régissent le comportement d'une onde électromagnétique ($\vec{E}$, $\vec{H}$) sont les suivantes :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu \dfrac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} . \vec{E} = \dfrac{\rho}{\varepsilon} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \varepsilon \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} . \vec{H} = 0 \end{cases}$$

Avec

$\vec{E}$, $\vec{H}$: champs électrique et magnétique

$\vec{J}$, ρ : densités volumiques de courant et de charge.

ε, µ sont respectivement la permittivité et la perméabilité du milieu.

Si l'on considère que le milieu de propagation ne contient ni charges ni courants ($\rho = 0, \vec{J} = 0$), dans ces conditions, les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu \dfrac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} . \vec{E} = 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \varepsilon \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} . \vec{H} = 0 \end{cases}$$

<u>But : Etablir 2 équations différentielles en $\vec{E}$ et en $\vec{H}$.</u>

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{\nabla} \wedge \vec{H}\right) = \vec{\nabla} \wedge (\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) = -\varepsilon\mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\vec{H}\right).$$

Or, la propriété du rotationnel permet d'écrire :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{\nabla} \wedge \vec{H}\right) = \vec{\nabla} . (\vec{\nabla} . \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} = -\nabla^2 \vec{H}$$

Donc, $\boxed{\nabla^2 \vec{H} - \varepsilon\mu \dfrac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\vec{H}\right) = 0}$

De même pour $\vec{E}$, on montre que : $\boxed{\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon\mu \dfrac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\vec{E}\right) = 0}$

On pose : $\varepsilon\mu = \frac{1}{v^2}$, où v est la vitesse de propagation. (Dans le vide v=c=3.10^8 m/s).

Donc, $\boxed{\begin{cases} \nabla^2 \vec{H} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\vec{H}\right) = 0 \\ \nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\vec{E}\right) = 0 \end{cases}}$

<u>But : Vérifier que $H = H_0.\cos(\omega t - kz)$ est solution de cette équation différentielle.</u>

$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0$.

Donc, $\frac{\partial^2 (H_0.\cos(\omega t - kz))}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 (H_0.\cos(\omega t - kz))}{\partial t^2} = 0$

Donc, $+kH_0 \frac{\partial(\sin(\omega t - kz))}{\partial z} - \frac{1}{v^2} H_0.\omega \frac{\partial(\sin(\omega t - kz))}{\partial t} = 0$

Donc, $-k^2 H_0 \cos(\omega t - kz) + \frac{1}{v^2} H_0.\omega^2 \cos(\omega t - kz) = 0$

Donc, $-k^2 + \frac{1}{v^2}.\omega^2 = 0$

Donc, $k = \frac{\omega}{v}$: constante de propagation

De même, on peut vérifier que $H = H_0.\cos(\omega t + kz)$ <u>est solution de cette équation différentielle.</u>

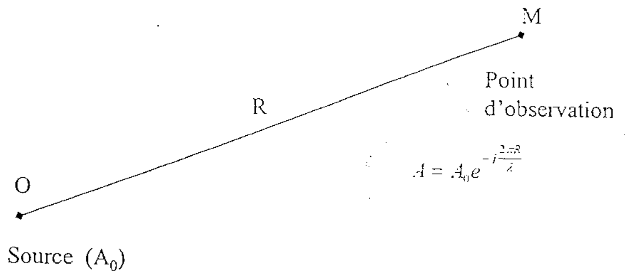
2) PROPAGATION DE L'ONDE

On considère une source dont l'amplitude de la vibration varie sinusoïdalement en fonction du temps : $s(0,t) = A_0.\sin(\omega t)$.

Cette vibration se propage dans l'espace sous la forme d'une onde.

Pour un trajet de longueur z, le déphasage correspondant est $\varphi = -\frac{2\pi z}{\lambda}$, le signe (-) précise qu'il s'agit d'un retard de phase. La vibration à cette distance est donnée par : $s(z,t) = A_0.\sin(\omega t + \varphi)$

A la distance z, la vibration est ce qu'elle était un temps τ plus tôt à son départ : $s(z,t) = s(0, t - \Delta t), avec\, \Delta t = \frac{2\pi z}{\lambda\omega}$.



A_0 et A étant les amplitudes complexes de la source O et du point M.

Le lieu des points équiphases est appelé front d'onde. Dans un milieu homogène à 3 dimensions où la propagation se fait de la même manière dans toutes les directions, le front d'onde est une sphère et l'onde est dite sphérique.

3) EQUATIONS DE PROPAGATION DANS L'ESPACE

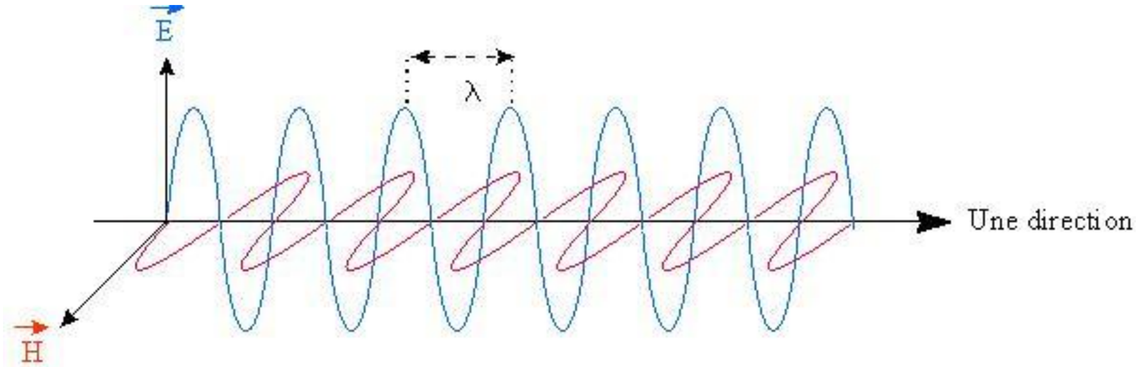
S(t,M) : on suppose que l'onde est définie partout dans l'espace.

- On dit que S se propage par ondes planes progressives dans le sens des x positifs si $s(t,M) = f(t - \frac{z}{v})$.
- Si S se propage dans le sens des x négatifs, on dit que S se propage par ondes planes réfléchies.
- Une o.e.m est dite plane si $\vec{E}$ ou $\vec{H}$ ne dépend que d'une seule coordonnée de l'espace (z dans cet exemple).
- Une o.e.m est dite transversale si la vibration s'effectue dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation.
- Une o.e.m est dite longitudinale si la vibration s'effectue dans un plan parallèle à la direction de propagation.
- Pour une onde plane, à chaque instant, on a : $E = E_+ f(t - \frac{z}{v}) + E_- g(t + \frac{z}{v})$ et

$B = B_+ f(t - \frac{z}{v}) + B_- g(t + \frac{z}{v})$

Conclusion : On peut montrer que :

$$\boxed{\begin{cases} \vec{E}, \vec{B} : ondes\ transversales \\ E = cB \\ \vec{E} \perp \vec{B} \end{cases}}$$

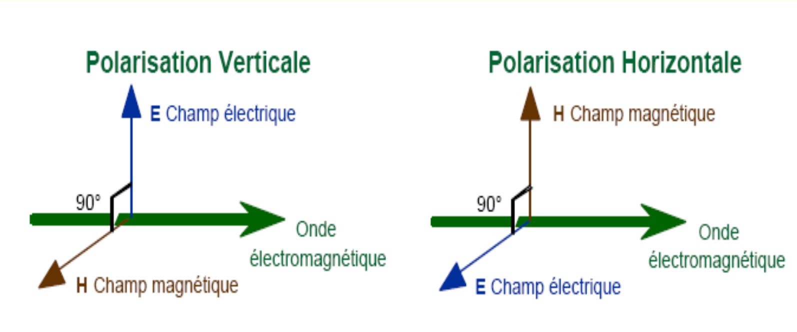


Structure de l'onde électromagnétique dans l'espace

- Les traits bleus représentent les variations dans l'espace du champ électrique E exprimé en V/m. Ce champs varie de façon sinusoïdale dans le temps (même fréquence que celle de l'émetteur), et compte tenu qu'il se propage à la vitesse c $=3\ 10^8$ m/s on retrouve la même longueur d'onde $\lambda = c/F$
- Les traits rouges représentent les variations du champ magnétique H exprimé en A/m.

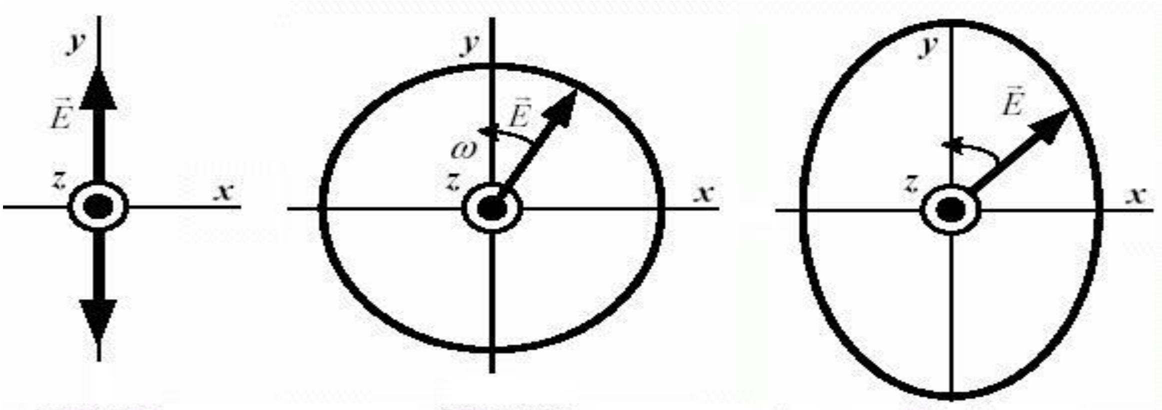
4) POLARISATION D'UNE ONDE

L'onde électromagnétique est rayonnée selon un plan de polarisation. Elle est composée de deux "vecteurs en quadrature" appelés "champ électrique" ou E et "champ magnétique"ou H. On dit qu'ils sont en quadrature lorsque qu'ils sont déphasés de 90° l'un par rapport à l'autre.



Par convention, le plan de polarisation est défini selon l'orientation du champ électrique. Lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique verticalement, on dit que la polarisation est verticale. À l'inverse, lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique horizontalement, on dit que la polarisation est horizontale. Dans certaines conditions, la polarisation peut être aussi "circulaire droite ou circulaire gauche".

La polarisation correspond à la direction et à l'amplitude du champ électrique $\vec{E}$. Pour une onde non polarisée, ou naturelle, $\vec{E}$ tourne autour de son axe de façon aléatoire et imprévisible au cours du temps. Polariser une onde correspond à donner une trajectoire définie au champ électrique. Il y a plusieurs sortes de polarisation:



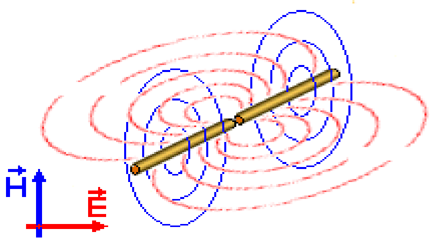
1. Une onde plane est dite à polarisation rectiligne si le champ électrique est constamment dirigé dans la même direction.

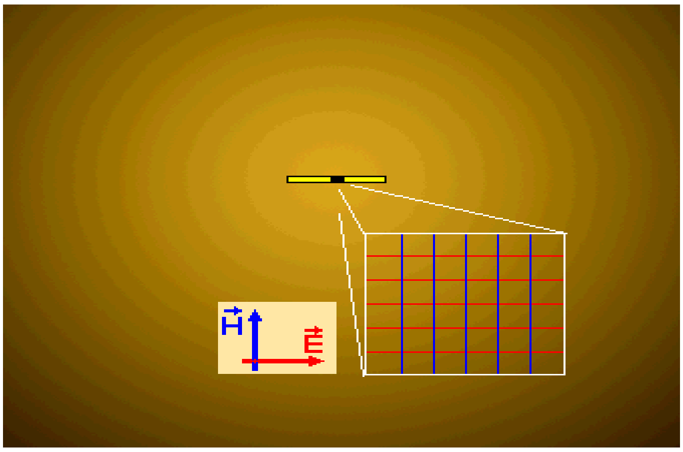
- L'onde est dite à polarisation circulaire si l'extrémité du vecteur $\vec{E}$ décrit un cercle, ce cas de figure peut se présenter en considérant deux doublets orthogonaux alimentés en quadrature.
- L'onde est dite à polarisation elliptique si l'extrémité du vecteur $\vec{E}$ décrit une ellipse.

Importance de la polarisation :

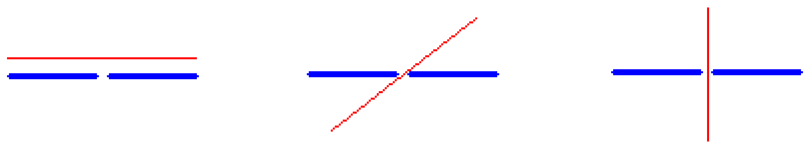
- Un critère important dans les transmissions radio est la polarisation de l'onde électromagnétique. Il est souhaitable que les antennes des deux correspondants soient polarisées identiquement, ce qui ne nous met pas à l'abri d'une rotation de polarisation sur un parcours donné.
- Quand on parle de polarisation, on parle de l'orientation du champ électrique de l'onde électromagnétique. Les deux vecteurs représentatifs des champs magnétique et électrique sont orthogonaux (perpendiculaires entre eux).
  - La polarisation d'une onde électromagnétique est décrite par l'orientation de son champ électrique. Si celui-ci est parallèle à la surface de la terre, la polarisation est linéaire horizontale, s'il est perpendiculaire à la surface de la terre la polarisation est linéaire verticale, s'il tourne, la polarisation est circulaire.

- Pour toutes les antennes filaires ou à brins rayonnants comme les Yagis, la polarisation est simple à déterminer puisque identique à l'orientation physique de l'antenne. Un brin vertical polarisera verticalement, un brin horizontal produira une polarisation horizontale.





<u>Question : Pourquoi faut-il utiliser la même polarisation des deux côtés d'une liaison ?</u>



Champ E aligné sur le dipôle Champ E ayant subi une rotation Champ E orthognal (90°)

- Dans le premier cas, l'onde reçue est de même polarisation, tout va bien.
- Dans le second cas, l'onde a subi une légère rotation (rotation dans l'ionosphère, inclinaison d'une antenne mobile etc.)

Dans le troisième cas, on est en présence d'un signal émis en polarisation verticale et reçu en polarisation horizontale. La bonne question à se poser et de savoir quelle seront les dégradations en termes de puissance du signal que ces rotations vont produire.

Si on fait régner dans un espace 2 champs électromagnétiques synchrones, d'amplitudes ou de directions différentes, déphasés l'un par rapport à l'autre, on obtiendra un champ représenté par un vecteur dont le sommet décrit une ellipse.

Démonstration pour le cas où les 2 champs composants E1 et E2 sont perpendiculaires :

$$\begin{cases} E_1 = a.\cos\omega t \\ E_2 = b.\cos(\omega t + \varphi) \end{cases}$$

L'extrémité du vecteur résultant étant M, on peut écrire : $\begin{cases} y = a.\cos\omega t \\ x = b.\cos(\omega t + \varphi) \end{cases}$,

Donc, $x = b.\cos(\omega t)\cos(\varphi) - b.\sin(\omega t)\sin(\varphi)$

Mais, $\begin{cases} \cos\omega t = \dfrac{y}{a} \\ \sin\omega t = \pm\sqrt{1-\left(\dfrac{y}{a}\right)^2} \end{cases}$

Donc, après calculs, $\frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} - 2\frac{xy}{ab}\cos\varphi = \sin^2\varphi$: équation d'une ellipse ayant l'origine pour centre.

L'angle θ entre l'axe de l'ellipse et Ox est donné par : $tg2\theta = \frac{2ab\cos\varphi}{b^2 - a^2}$

Cas particuliers :

- Si les 2 champs composants sont en phase ($\varphi = 0$). L'équation devient :

  $\frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} - 2\frac{xy}{ab} = 0$. Soit : $(\frac{y}{a} - \frac{x}{b})^2 = 0$.

C'est l'équation d'une droite double ; le point M parcourt donc une droite aller et retour pendant un cycle complet. La polarisation est rectiligne.

- Si les 2 champs composants sont en quadrature de phase ($\varphi = \pi/2$).

  L'équation devient : $\frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} = 1$. Soit : $(\frac{y}{a} - \frac{x}{b})^2 = 0$.

Le point M décrit une ellipse dont les axes sont Ox et Oy.

Un cas particulièrement intéressent est celui où E1=E2, c'est-à-dire où a=b.

On a alors : $y^2 + x^2 = a^2$, c'est l'équation d'un cercle ; dans ce cas la polarisation est dite circulaire.

Une onde à polarisation circulaire est donc constituée par deux champs égaux perpendiculaires dans l'espace et déphasés entre eux de 90°.

Nous rencontrerons des antennes utilisant ce type de polarisation.